

Ray Tracing 기법을 이용한 태양광 발전량 시뮬레이션

박혜진¹ · 신명훈^{2*}

¹한국항공대학교 항공전자정보공학부, 학생 연구원

²한국항공대학교 항공전자정보공학부, 교수

Power Generation Simulation for Photovoltaic Device Using Ray Tracing

Park Hyejin¹ · Shin Myunghun^{2*}

¹Student, School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University

²Professor, School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University

[†]Corresponding author: mhshin@kau.ac.kr

Abstract

Recently, with the increase in regulations on self-power generation of energy in buildings, building-integrated photovoltaic systems (BIPV), that is, solar power on the outer walls of buildings, are also on the rise. Thus, considering the shadow of a building, the power generation of an elevated solar cell module according to differences in location, shadow, and reflectance (albedo) must be analyzed. In this study, we used a ray-tracing method and a three-dimensional (3D) optical design simulation program. For ray-tracing simulation, we produced sophisticated structures and provided optical properties, and a correction process for the surface temperature was conducted using a temperature correction formula. In addition, the characteristics and accuracy of the simulation were compared using Solar Pro data. Finally, in this study, we report the amount of power generated according to differences in location, shade, and reflectance (albedo).

Keywords: 건물일체형 태양광발전 시스템(BIPV system), 일사량 시뮬레이션(Solar radiation simulation), 광선 추적(Ray tracing)

1. 서론

건물 내 에너지 자가발전 규제가 증가함에 따라, 건물 외벽 면 태양광발전(BIPV) 또한 증가하는 추세를 보이고 있다. 이에 외벽 면에 태양광 모듈 부착 시 발생 되는 전력을 예측 하여, 효율적인 방향으로 태양광 모듈을 사용하기 위한 연구 및 설계가 필요할 것으로 판단된다. 기존 연구들의 경우, 간단한 설계를 통한 실측값으로 비교 및 분석을 진행하나 이는 설계 후 수정이 어렵기에 시간 및 비용 소비가 클 것으로 예상된다. 시간 및 비용 소비 측면에서, 시뮬레이션을 통해 태양광 모듈의 발전 효율을 사전에 예측하고 이를 바탕으로

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.43, No.6, pp.29-37, December 2023
<https://doi.org/10.7836/kSES.2023.43.6.029>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 22 October 2023

Revised: 2 November 2023

Accepted: 4 November 2023

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

설계를 진행한다면 더욱 효율적인 연구 및 태양광발전 시스템 구축이 가능해질 것이다.

본 연구에서는 건물의 음영을 고려하여 위치, 음영, 반사율(albedo) 차이에 따른 입면 태양광 모듈의 발전량을 분석하고자 한다. 위치, 음영, 반사율(albedo) 차이를 비교하기 위해 정밀한 Ray tracing 방법이 요구되기 때문에 3D 광학 설계 시뮬레이션 프로그램인 LightTools (Synopsys)를 이용하였다.

Ray tracing 방법을 사용하면, 정교한 구조물 생성이 가능하며 주변 환경에 대해서 다양한 광학 속성 부여가 가능하다. Ray tracing에서는 반사, 흡수, 투과뿐만 아니라 회절, 산란 방식에 따른 반사 및 투과, 흡수 등 각 구조물 특성에 맞는 광학 속성을 세밀하게 설정할 수 있다. 그러나 시뮬레이션 진행 시에는 표면 온도가 고려되지 않기 때문에 온도 보정 수식을 포함해 발전량을 분석하는 과정이 필요하다. 이를 이용해 건물의 위치, 방향, 음영, 반사율(albedo)을 고려한 연간 발전량 시뮬레이션을 수행하였다. Ray tracing 기법을 이용해 계산된 발전량 데이터와 Solar Pro의 발전량 데이터를 비교하는 과정을 통해 툴의 특성과 정확도를 비교할 수 있도록 하였다.

2. 연구 방법

2.1 건물 규격

본 연구는 한국항공대학교 교내 과학관, 기계관, 전자관이 연결 되어 있는 디근자 형태의 건물을 기반으로 시뮬레이션을 진행하였다. 상단 건물부터 반시계방향으로 과학관, 기계관, 전자관에 해당하며, 지도 및 설계 도면을 이용하여 각 건물의 규격을 확인하고 설계에 반영하였다. Fig. 1은 확인된 규격을 토대로 설계한 건물을 위쪽에서 바라본 모습이다.

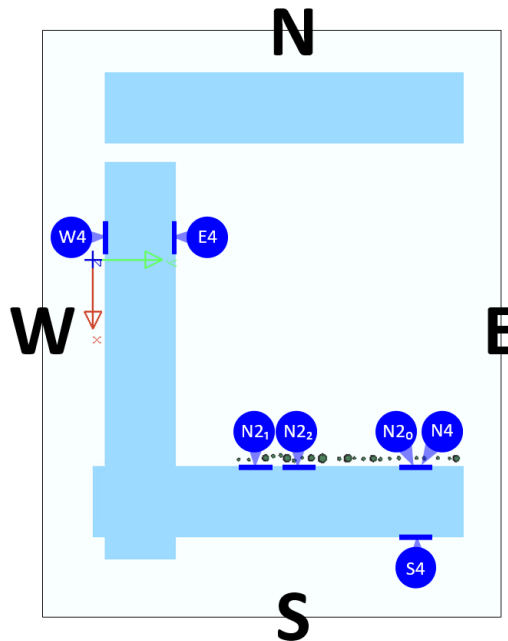


Fig. 1 Drawing of the designed building from above and the location of the BIPV

Fig. 1에 표기된 E/W/S/N은 태양광 모듈의 설치 방향(동,서,남,북: East, West, South, North)을, 숫자는 태양광 모듈이 부착된 층수를 의미한다. E4는 East 4th floor를 의미하며, 아래 첨자의 숫자는 그림자의 영향을 의미한다. 0은 그림자가 없는 부분(N2₀)을, 상대적으로 1은 그림자의 영향이 조금 있는 부분(N2₁)을, 2는 그림자의 영향을 많이 받는 부분(N2₂)이다.

기상 데이터는 이를 처리하고 분석하는 소프트웨어인 Meteonorm을 이용해 시뮬레이션의 포맷에 맞게 추출하였다. 2021년도 서울 지역 시간에 따른 데이터를 사용하였으며 Ray tracing 시뮬레이션에는 Direct radiation, Diffuse radiation, Air temperature 값이 적용되었다.

2.2 태양광 모듈 규격

Ray tracing 기법을 이용하면, 태양광 모듈 자체에 대한 광학 속성 부여나 크기 조절이 가능하다. Ray tracing 시뮬레이션에 사용된 모듈 규격은 LONGi사의 태양광 모듈 Hi-MO 5 중 LR5-72HPH-535M 제품을 참고하였다¹⁾. 주어진 모듈의 크기는 2256 × 1133 × 35 mm이며 최대출력은 535 W, P_{max}의 온도 계수는 -0.340%/°C이다. 이때, 최대출력과 온도 계수는 STC (AM1.5, 1000 W/m², 25°C) 조건을 기준으로 한다.

Ray tracing 시뮬레이션 진행 시, 최대출력을 기준으로 시뮬레이션 파라미터를 설정하였고, 표면 온도가 고려되지 않는 시뮬레이션의 발전량을 보정하는 과정에 온도 보정계수가 사용되었다²⁾.

3. 온도 보정

3.1 온도 보정 수식

Ray tracing 기법에 태양광 모듈 표면 온도를 고려하기 위해 다음과 같은 온도 보정 수식을 이용해 보정하는 과정이 필요하다. 온도 보정 수식은 다음과 같다^{3,4)}.

$$P = P_0 \times [1 + \alpha(T_s - T_0)] \quad (1)$$

P : 보정된 전력[W]

P_0 : 참조 온도(T_0)에서 측정된 전력[W]

α : 온도 계수(일반적으로 -0.4 ~ -0.5%/°C)[%/°C]

T_s : 태양광 모듈 표면 온도[°C]

T_0 : 참조 온도(25°C)[°C]

온도 보정은 태양광 모듈의 표면 온도가 고려되지 않는 Ray tracing 기법을 사용해 구해진 발전량에 대해 진행된다. P_0 는 온도가 고려되지 않은 계산된 발전량, T_s 는 측정된 태양광 모듈의 표면 온도이며, 온도 보정계수

를 이용해 최종적으로 보정 후 온도가 고려된 발전량 값이 P 를 의미한다.

온도 보정 수식을 이용해 발전량 값을 보정하는 과정은 태양광 모듈의 표면 온도와 기준 온도 차이에 의해 결정된다. 태양광 모듈의 표면 온도가 기준 온도보다 높은 경우에는 $T_s - T_0$ 값이 양수가 되어 $\alpha(T_s - T_0)$ 의 값이 음수가 되기 때문에 보정 전의 발전량보다 감소한다. 이는 태양광 모듈의 표면 온도가 높아져 오히려 효율이 떨어지는 것을 의미한다⁵⁾. 반대로, 태양광 모듈의 표면 온도가 기준 온도보다 낮은 경우에는 $T_s - T_0$ 값이 음수가 되어 $\alpha(T_s - T_0)$ 의 값이 양수가 되기 때문에 보정된 전력 값은 보정 전보다 증가한다.

다만, 건물 방향에 따라서 풍향과 풍량에 대한 정보는 고려되지 않아 공기 온도에 따른 태양광 모듈의 온도 변화는 고려하지 않았으나 향후 풍향과 풍량을 고려한 보다 정밀한 온도 보정 모델을 사용한다면 더 정확한 계산이 가능할 것이다.

3.2 온도 보정 후의 태양광 모듈 발전량

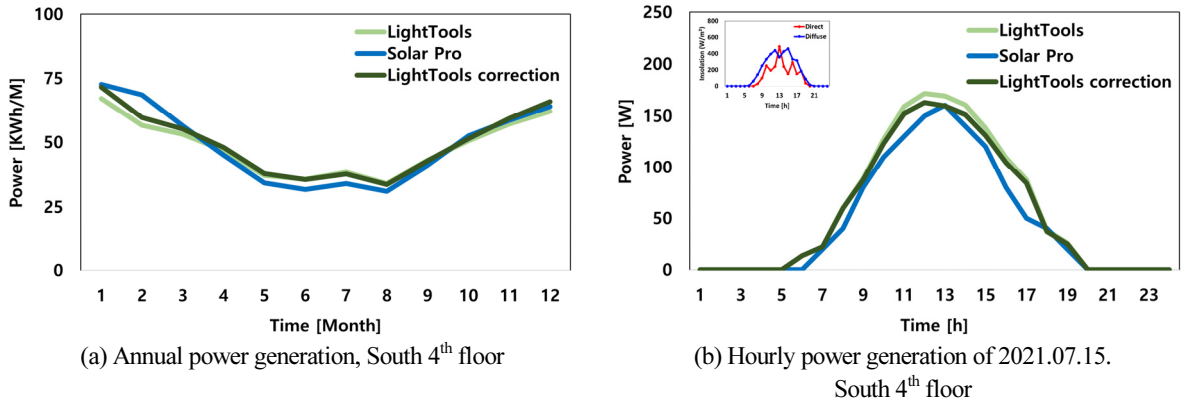


Fig. 2 Comparing the power generation of Ray tracing with Solar Pro using a temperature calibration formula

Fig. 2는 온도 보정 수식을 이용해 발전량을 보정 하기 전과 후를 Solar Pro와 비교하여 나타낸 그래프이다. Solar Pro와 최종 계산된 발전량 그래프는 모두 비슷한 개형을 보이며, 온도 보정 이후 더욱 비슷한 방향으로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2(a)는 남쪽 방향의 4층 높이에 위치한 태양광 모듈을 기반으로 시뮬레이션을 진행한 연간 발전량 그래프이다. 태양광 모듈의 표면 온도와 기준 온도 차이에 의해 보정 이후 발전량 값이 계절에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이는 태양광 모듈의 표면 온도에 따라 발전 효율이 달라지는 부분이 적용되어 나타난다. 태양광 모듈의 표면 온도가 기준 온도보다 높아지는 하절기에는 태양광발전 효율이 감소하므로 보정된 발전량이 감소하는 방향으로 변화하며 Solar Pro에 근접해 가는 경향을 보인다. 반대로 동절기에는 보정된 발전량이 증가하는 방향으로 변화하며 Solar Pro에 근접해 가는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2(b)는 2021년 7월 15일 남쪽 방향의 4층 높이에 위치한 태양광 모듈을 기반으로 시뮬레이션을 진행한 결과이다. 이는 온도 보정 전과 후의 계산된 발전량을 Solar Pro의 발전량과 비교하여 시간에 따라 나타낸 그래

프이다. 좌측 상단의 그래프는 2021년 7월 15일에 대한 일사량 그래프이며 Direct는 직달 일사량을, Diffuse는 산란 일사량을 의미한다. 시간에 따른 발전량 그래프 역시 서로 비슷한 개형을 보이며, 온도 보정 이후에는 두 발전량 값이 더욱 근접한 값으로 변화하고 있다.

4. 발전량 데이터 비교 및 분석

4.1 방향에 따른 발전량

태양광 모듈의 방향에 따른 발전량을 확인하기 위해 동/서/남/북 각 방향마다 4층 높이에 태양광 모듈을 부착하여 시뮬레이션을 진행한 결과이다.

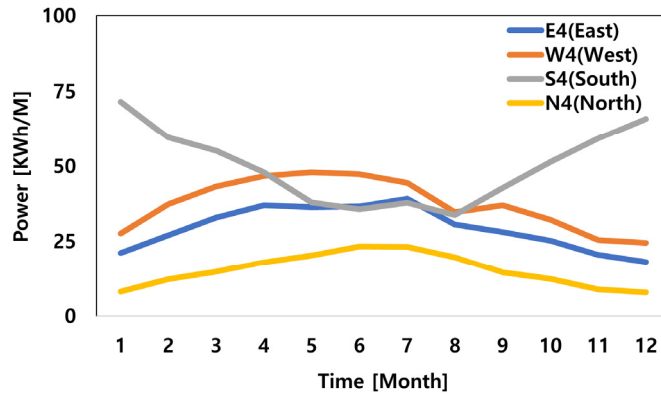


Fig. 3 Annual power generation of photovoltaic module depending direction

Fig. 3은 태양광 모듈 방향에 따른 연간 발전량을 나타내며 이는 Ray tracing 기법을 이용해 구해진 발전량에 온도 보정 과정을 적용한 결과이다. 계절에 따른 태양의 남중고도의 영향으로 남쪽 방향의 연간 발전량 그래프가 U자 형태로 뒤집힌 개형을 보이고 있다⁶⁾.

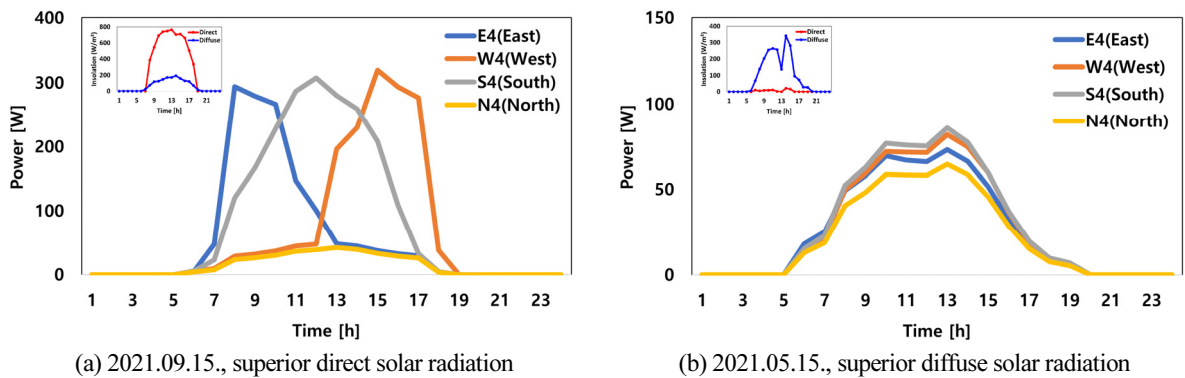


Fig. 4 Hourly power generation of photovoltaic module depending on direction (4th floor)

Fig. 4는 4층 높이에 위치한 태양광 모듈을 기반으로 시뮬레이션을 진행한 결과이다. Fig. 4(a)와 (b) 그래프 내에 좌측 상단의 그래프는 2021년 9월 15일과 5월 15일에 대한 일사량 그래프이며 Direct는 직달 일사량을, Diffuse는 산란 일사량을 의미한다. Fig. 4(a)는 태양의 직달 일사량이 우세한 경우, 태양광 모듈 방향에 따른 발전량을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 그 결과 하루 동안 태양의 위치가 변화함에 따라 태양광 모듈의 설치 방향마다 발전량이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 하루 동안 태양의 위치 변화는 동쪽에서 남쪽을 거쳐 서쪽으로 이동한다. 이에 따라 동쪽에서는 오전 시간대에 발전량이 높고, 남쪽에서는 정오에, 서쪽에 설치된 태양광 모듈에서는 오후 시간대에 발전량이 높게 나타났다. 또한 태양의 직달 일사량이 우세한 경우에는 직달 일사량의 개형을 따라 그래프가 생성되었고 특히 남쪽 방향에서 그 성향이 더욱 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4(b)는 태양의 산란 일사량이 우세한 경우, 태양광 모듈 방향에 따른 발전량을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 산란 일사량이 우세한 경우에는 태양광 모듈의 설치 방향에 관계없이 산란 일사량 그래프의 개형을 따라 발전량 그래프가 생성되었다.

4.2 그림자의 영향에 따른 발전량

그림자의 영향에 따른 발전량을 확인하기 위해 건물 앞에 크기가 다른 나무 모양의 구조물을 설계한 후 시뮬레이션을 진행하였다. N2는 북쪽 방향 2층에 위치한 태양광 모듈을 의미하며, 아래 첨자 숫자는 그림자의 영향을 상대적으로 나타낸 것이다. N2₀는 그림자의 영향이 없는 부분, N2₁은 그림자의 영향이 상대적으로 적은 부분, N2₂는 그림자의 영향을 많이 받는 부분을 나타낸다.

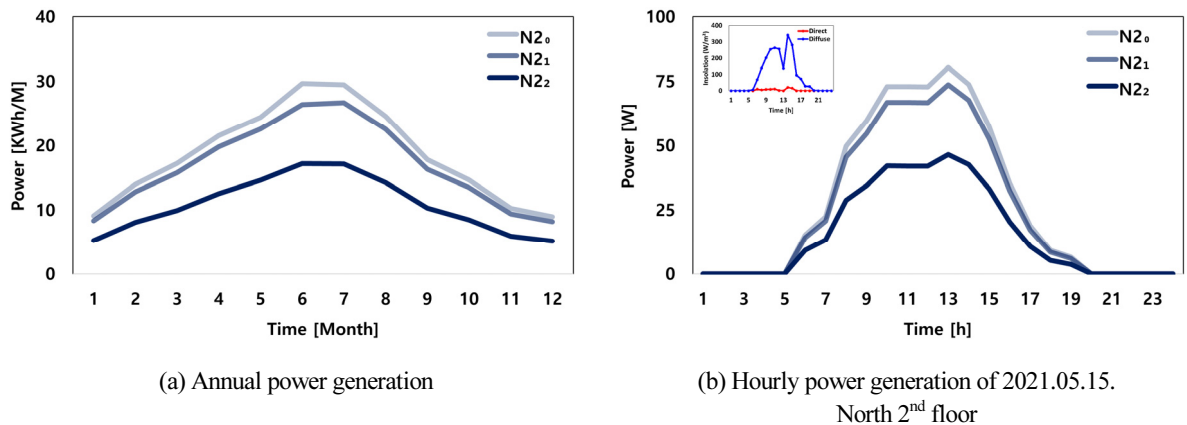


Fig. 5 Power generation of photovoltaic module depending on shadow effects

Fig. 5는 태양광 모듈에 미치는 그림자의 영향에 따른 발전량 그래프이다. Fig. 5(a)는 연간 발전량을, Fig. 5(b)는 시간에 따른 발전량을 보여주며 두 그래프 모두 그림자의 영향이 커질수록 발전량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그림자의 영향이 없는 부분에서 발전량이 가장 많고, 그림자가 많이 생성되는 부분일수록 발전량이

감소하였다. Fig. 5(b)는 2021년 5월 15일 북쪽 방향의 2층 높이에 위치한 태양광 모듈을 기반으로 시뮬레이션을 진행한 결과이며 좌측 상단의 그래프는 2021년 5월 15일에 대한 일사량 그래프로 Direct는 직달 일사량을, Diffuse는 산란 일사량을 의미한다. Solar Pro도 그림자의 영향에 따른 발전량 시뮬레이션이 가능하나, 정교한 구조물 설계 및 그 특성을 반영하는 광학 속성 적용이 가능한 Ray tracing 기법을 사용하여 진행하였다.

4.3 Albedo 값의 변화에 따른 발전량

아스팔트와 나무 등 주변 구조물의 반사율(Albedo) 값에 따른 발전량을 확인하기 위해 반사율에 영향을 받을 수 있는 위치인 2층 높이에 태양광 모듈을 부착하여 시뮬레이션을 진행하였다.

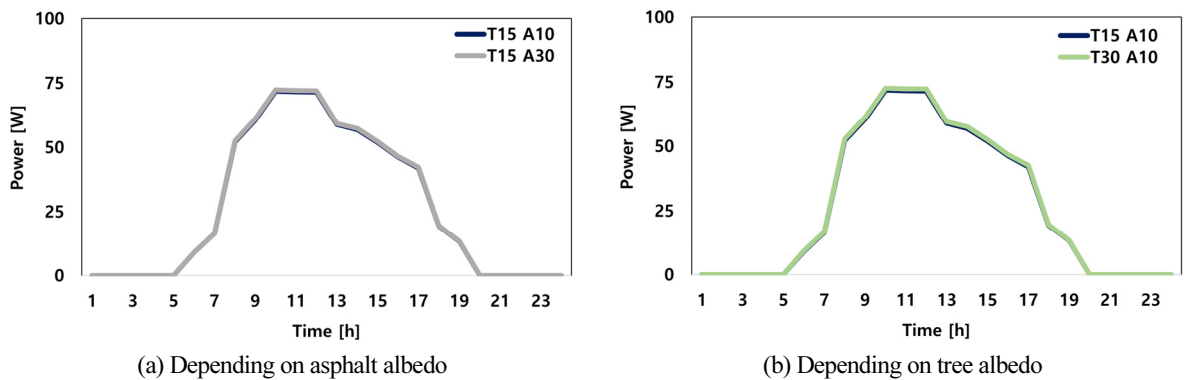


Fig. 6 Power generation of photovoltaic module depending on albedo (2021.04.15. North 2nd floor)

Fig. 6은 2021년 4월 15일 북쪽 방향의 2층 높이에 위치한 태양광 모듈을 기반으로 시뮬레이션을 진행한 결과이며, 주변 구조물의 반사율에 따른 발전량 그래프를 나타낸다. Fig. 6(a)는 아스팔트 반사율 값에 따른 발전량으로 나무 반사율이 15%로 일정할 때, 아스팔트 반사율을 10%와 30%로 설정한 후 비교하였다. Fig. 6(b)는 나무 반사율 값에 따른 발전량으로 아스팔트 반사율이 10%로 일정할 때, 나무 반사율을 15%와 30%로 설정한 후 비교하였다. 그 결과 두 그래프 모두 주변 구조물의 반사율 값이 높아질수록 발전량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6 내의 범례에서 T는 Tree를, A는 Asphalt를 의미한다. 반사율에 따른 발전량 결과 또한 각 구조물의 특성에 따른 광학 속성 부여가 가능한 Ray tracing 기법을 사용해 비교하였다.

5. 결론

본 연구는 건물의 음영을 고려하여 위치, 음영, 반사율(albedo) 차이에 따른 입면 태양광 모듈의 발전량에 대해 분석하였다. Ray tracing 기법을 이용한 시뮬레이션에서는 주변 구조물에 의해 확산되는 광선을 고려한 시뮬레이션이 가능하며 반사, 흡수, 투과 뿐만 아니라 회절, 산란 방식에 따른 반사 및 투과와 흡수 등 각 구조물 특성에 맞는 광학 속성을 세밀하게 설정할 수 있다. 본 연구를 위해서는 정밀한 Ray tracing 방법이 요구되므로

3D 광학 설계 시뮬레이션 프로그램인 LightTools (Synopsys)를 이용하였다. 이 과정에서 태양광 모듈의 표면 온도가 고려되지 않은 상태로 시뮬레이션이 진행되기 때문에 온도 보정 수식을 이용해 발전량 결과를 보정 해주었다.

본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) Solar Pro와 이번 연구에 사용한 Ray tracing 기법을 이용한 시뮬레이션 모두 태양광발전 시뮬레이션이 가능하다. 두 툴을 이용하여 추출한 발전량 그래프는 비슷한 개형을 보이거나 약간의 차이가 발생할 수 있다. 이는 두 툴의 가장 큰 차이점인 태양광 모듈의 표면 온도가 고려되는가에 따라 발생한다. Ray tracing 시뮬레이션 진행 시에는 태양광 모듈의 표면 온도가 고려되지 않기 때문에 온도 보정 수식을 이용해 보정을 진행해주면 Solar Pro의 그래프에 비슷한 방향으로 변화하는 결과를 보여주었다. 태양광 모듈의 표면 온도는 발전 효율에 영향을 미치며 이는 계절에 따른 발전량 값의 변화에도 영향을 준 것으로 볼 수 있다.
- 2) 태양광 모듈의 설치 방향에 따른 발전량은 방향에 따라 특정한 시간대에 집중되어 발생하는 것을 확인하였다. 이는 태양의 위치 변화에 의한 결과이다. 하루 동안 태양의 위치가 동쪽에서 남쪽을 거쳐 서쪽으로 변화하며 태양광 모듈의 설치 방향에 따라, 동쪽에서는 오전 시간대, 남쪽에서는 정오에, 서쪽에서는 오후 시간대에 많은 발전량을 보였다.
- 3) 태양광 모듈에 형성되는 음영의 영향에 따라 발전량이 달라지는 것을 확인하였다. 음영이 미치는 영향이 많은 부분일수록 발전량이 감소하였다.
- 4) 주변 구조물의 albedo인 반사율에 따라 발전량이 변화하였다. 주변 구조물의 반사율이 높아질수록 발전량이 증가하였으며, 이는 반사되어 태양광 모듈에 흡수되는 일사량이 증가하기 때문에 나타난 결과이다.

본 연구의 결과를 통해 Ray tracing 기법을 이용해 시뮬레이션을 진행하면 여러 요소를 고려한 입면 태양광 모듈의 발전량 비교가 가능하며, 이는 추후 태양광 관련 연구 및 태양광발전 시스템 구축이 더욱 효율적인 방향으로 나아가는데 기여할 수 있을 것이라 생각한다.

후기

This study was supported by the Energy Technology Development Program of the Korean Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) (Grant No. 20213091010020).

REFERENCES

1. LONGi, LR5-72HPH 535-545M (35-35&15)_V14_KR, 2022. <https://www.longi.com/kr/download/>. last accessed on the 12th October 2023.
2. Lee, I. R., Bae, I. S., Kim, J. O., and Shim, H., Photovoltaic System Output Forecasting by Solar Cell Conversion Efficiency Revision Factors, The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers B, Vol. 54B, No. 4, pp. 188-194, 2005.

3. Shin, J. H., Lee, Y. S., Lee, S. J., and Moon, J. F., A Study on the PV Module Power Measurement Method through Integrated Correction of Temperature and Irradiance, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 71P, No. 4, pp. 210-215, 2022, <https://doi.org/10.5370/KIEEP.2022.71.4.210>.
4. Shin, J. H., Lee, Y. S., Lee, S. J., and Moon, J. F., A Study on the Temperature Correction Method to Improve the Electrical Power Measurement of PV Module, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 71P, No. 2, pp. 87-92, 2022, <https://doi.org/10.5370/KIEEP.2022.71.2.87>.
5. Cho, S. W., A Study on the Relationship Between Photovoltaic Module Surface Temperature and Photovoltaic Power Using Real Experiment, Journal of the Korean Society for Geothermal and Hydrothermal Energy, Vol. 14, No. 3, pp. 8-14, 2018, <https://doi.org/10.17664/ksgee.2018.14.3.008>.
6. Yoon, J. H., An, Y. S., Song, J. H., Kim, S. G., Lee, S. J., and Choung, Y. K., A Study on the Power Performance Measurement of Transparent Thin-film PV Windows Depending on the Inclined Angle, Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol. 24, No. 9, pp. 271-278, 2008.